INSTITUT DE PHYSIQUE, UNIVERSITÉ DE NEUCHATEL
Directeur : Professeur Adrien Jaquerod

ÉTUDE ET APPLICATION D'UNE MÉTHODE PERMETTANT DE DÉTERMINER LE PREMIER MODULE D'ÉLASTICITÉ

THÈSE

présentée à la Faculté des Sciences de l'Université de Neuchâtel
pour l'obtention du grade de Docteur ès Sciences

PAR

JEAN-PAUL HUMBERSET
Licencié ès Sciences

EXTRAIT DU BULLETIN DE LA SOCIÉTÉ NEUCHATELOISE DES SCIENCES NATURELLES
TOME 70
1947

INSTITUT DE PHYSIQUE, UNIVERSITÉ DE NEUCHATEL
Directeur : Professeur Adrien Jaquerod

ÉTUDE ET APPLICATION D'UNE MÉTHODE PERMETTANT DE DÉTERMINER LE PREMIER MODULE D'ÉLASTICITÉ

THÈSE

présentée à la Faculté des Sciences de l'Université de Neuchâtel
pour l'obtention du grade de Docteur ès Sciences

PAR

JEAN-PAUL HUMBERSET
Licencié ès Sciences

EXTRAIT DU BULLETIN DE LA SOCIÉTÉ NEUCHATELOISE DES SCIENCES NATURELLES
TOME 70
1947

La Faculté des Sciences de l'Université de Neuchâtel, sur le rapport de MM. les professeurs Adrien Jaquerod, Henri Mügeli et Edmond Guyot, autorise l'impression de la présente thèse, sans exprimer d'opinion sur les propositions qui y sont contenues.

Neuchâtel, le 7 juin 1946.

Le doyen :
Jean G. Baer.



INSTITUT DE PHYSIQUE, UNIVERSITÉ DE NEUCHATEL
Directeur : Professeur Adrien Jaquerod

ÉTUDE ET APPLICATION D'UNE MÉTHODE PERMETTANT DE DÉTERMINER LE PREMIER MODULE D'ÉLASTICITÉ

par

JEAN-PAUL HUMBERSET
Licencié ès Sciences

AVEC 8 FIGURES.

Résumé.

Nous avons construit un appareil fondé sur les interférences lumineuses permettant de mesurer avec rapidité et grande précision le module d'élasticité (et ses variations éventuelles) d'un fil métallique recuit, soumis à une traction.

Nos mesures ont porté sur des fils de cuivre et de fer aussi purs qu'il est possible de les obtenir actuellement, de 1,30 m de long et de 2 mm de diamètre. Ces fils, recuits dans des conditions connues, ont été placés verticalement et soumis à une fatigue provoquée par une charge suspendue à leur extrémité inférieure et constante pour une même expérience. Nous avons déterminé le module d'Young de ces métaux et tenté d'en préciser les variations en fonction du temps.

Nous avons trouvé que le module variait peu : il croît légèrement pendant les premières heures ou les premiers jours pour atteindre une valeur constante.

Introduction.

Les auteurs d'une étude sur la loi de Hooke [1], entreprise en 1932 dans le même laboratoire, avaient constaté que le module d'Young d'un fil d'acier recuit, supportant une charge de 860 kg/cm^2, avait varié en fonction du temps, dans le sens d'une augmentation, d'allure exponentielle.

Ce fait, qui avait été mis en évidence dans un seul cas et en marge de l'étude considérée, n'a pas reçu confirmation. Nous avons repris le problème et cherché si ces variations existent et, si oui, quelle pouvait être l'allure de la courbe. La grande difficulté consiste à dégager les variations du module d'élasticité des erreurs de mesure provenant principalement de l'instabilité de la température. Les plus petites variations de température ont une répercussion importante sur les mesures et nous avons voué une attention particulière à l'élimination de cette influence. En outre, les mesures assez nombreuses doivent être réparties d'une façon plus ou moins serrée dans le temps (c'est l'expérience qui nous a dicté la fréquence de ces mesures) ; il était donc avantageux au point de vue pratique et nécessaire pour la précision qu'elles s'obtiennent rapidement avec un minimum de mise au point et de réglage. La méthode électrique, ingénieuse et précise, employée par les auteurs cités [1] et fondée sur les variations de capacité d'un condensateur, ne semble pas remplir ces conditions. Aussi bien, nous avons eu recours à la méthode optique déjà appliquée à la détermination du module d'élasticité par Grüneisen en 1907 [2]. Au surplus, elle s'est montrée plus précise encore que l'autre (cf. comparaison p. 74).

A M. le professeur Adrien Jaquerod, qui nous a conseillé au cours de ce travail, nous exprimons ici notre reconnaissance et nos vifs remerciements.

Nous remercions aussi M. Jean-Pierre Wagner, technicien-mécanicien de l'Institut de Physique, qui a construit l'appareil et nous a aidé en maintes circonstances.

[1] Jaquerod et Zuber : *Helvetica Physica Acta.* Vol. V (1932), p. 442.
[2] *Ann. d. Phys. XXII* (1907), p. 801.

A. DESCRIPTION DE L'APPAREIL.

1. *Principe.* — Deux disques de glace (verre plan poli) semi-argentés, parallèles et distants de 2 ou 3 mm, reçoivent de la lumière monochromatique et produisent les anneaux à l'infini des lames épaisses. La glace supérieure est fixée au fil d'épreuve, l'autre, à une plaque métallique scellée dans le mur. Si l'on exerce une traction sur le fil à l'aide d'un ressort à boudin, les anneaux, observés dans une lunette mise au point sur l'infini, se rétrécissent et fondent au centre. Si, au contraire, on relâche le ressort, les anneaux s'évasent et naissent au centre. La disparition ou la naissance d'un anneau correspond à un allongement ou à une contraction du fil ayant pour mesure une demi-longueur d'onde de la radiation employée. Connaissant le nombre des anneaux qui défilent et l'extension du ressort, c'est-à-dire la force exercée, on peut calculer le module d'élasticité.

2. *Organes principaux.* — Une solide potence constituée par du fer en U, scellée dans le mur à 2,70 m de hauteur, supporte le fil à étudier (fig. 1 et 2). La partie supérieure de celui-ci passe au travers d'une forte vis en laiton dans laquelle elle est rivée et soudée. L'extrémité inférieure est serrée dans un mandrin qui fait pièce unique avec une tige de fer le long de laquelle viennent s'étager des disques de plomb constituant la charge permanente. Le poids total de ces disques varie entre 5 et 35 kg, ce qui donne une tension de 160 à 1050 kg/cm^2 environ pour un fil du diamètre indiqué (2 mm). Au-dessous de ces disques est un nouveau mandrin qui tient le ressort à boudin. Le premier ressort, employé pour les fils de cuivre, exerce une force de 3,45 g/mm et le deuxième, destiné aux fils de fer, 6,75 g/mm (cf. étalonnage page 69). Pour obtenir le passage de dix anneaux, il faut un allongement du ressort de quelque 25 mm, qui correspond à une charge additionnelle de 90 et 170 g respectivement, c'est-à-dire à une tension de 2,8 et 5,4 kg/cm^2. Le ressort est commandé par un chariot de tour au moyen d'un fil d'acier souple passant sur une poulie. Le tambour du chariot donne le centième de mm : les allongements du ressort sont donc connus avec cette précision. La poulie doit être convenablement placée afin que la traction se fasse exactement dans le sens vertical et n'altère pas la netteté des anneaux. A cet effet, on suspend un poids de 100 g au fil d'acier et on laisse le tout pendre librement. Un repère placé sur le support de la poulie permet de rendre au fil la position voulue lors de sa mise en place définitive.

3. *Optique.* — L'organe optique est composé de deux parties qui supportent les glaces et les accessoires de réglage (fig. 3 et 4). Les glaces, circulaires, ont 6 mm d'épaisseur et 23 mm de diamètre ; les faces en regard sont aussi planes que possible et ont été taillées par un fabricant spécialisé. Pour les contrôler, nous avons observé les franges du coin d'air qui se sont montrées bien rectilignes. La première

de ces glaces est enchâssée excentriquement dans un disque de laiton qui, lui-même, se fixe au fil d'épreuve à l'aide d'un petit mandrin. La seconde, placée sous la première, à 3 mm environ, est logée dans une

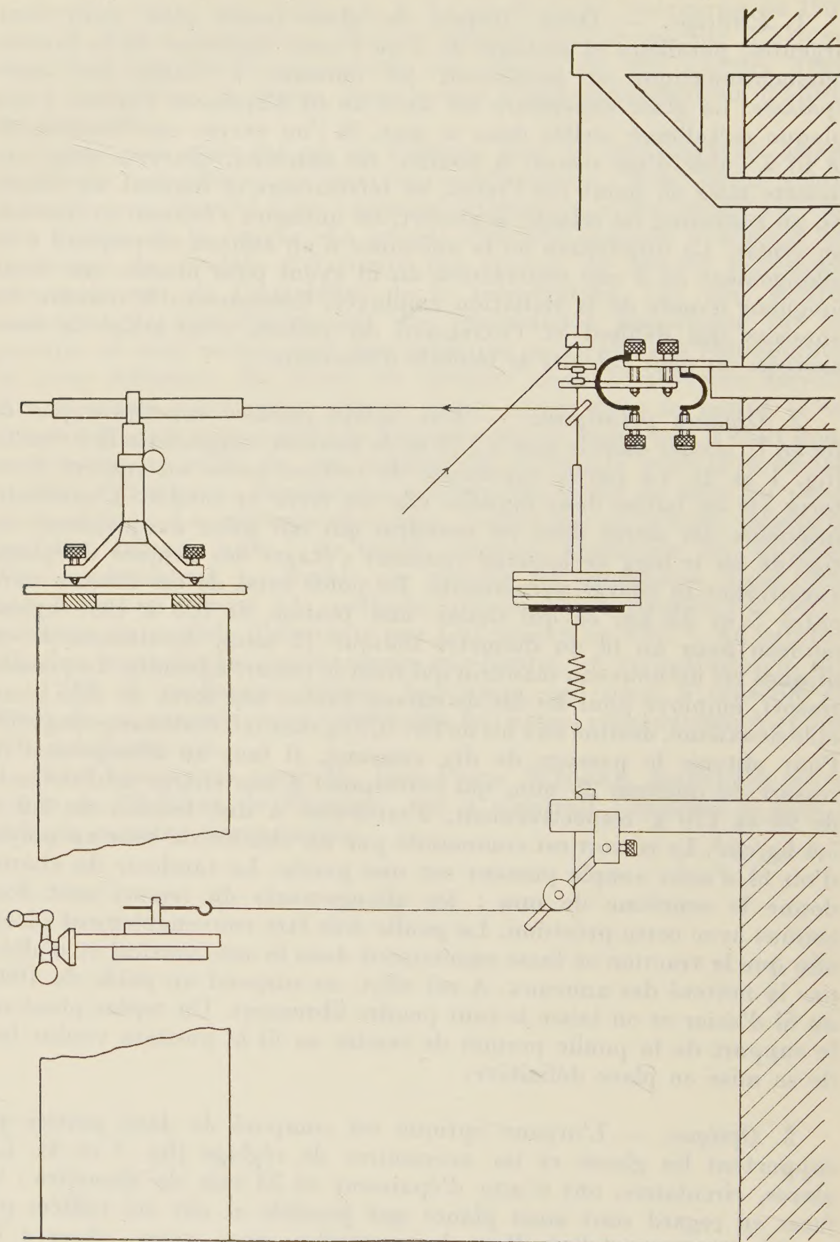


Fig. 1. Schéma de l'appareil.

plaque, de laiton également, découpée en forme de croix et soutenue par trois grosses vis à tête moletée. Ces vis passent, sans filetage, dans une autre pièce rigide, solidaire du mur. Grâce à ce jeu de vis, les glaces peuvent être rendues à peu près parallèles. Le parallélisme quasi rigoureux nécessaire est obtenu par un réglage fin : trois lames de ressort en forme de demi-cercle, exercent sur la plaque rigide supérieure des pressions ou des tractions et provoquent de la sorte, par flexion, des déplacements infimes de cette plaque. Ces ressorts sont réglés par des vis qui prennent appui sur une nouvelle pièce scellée dans le mur, tout à fait indépendante des précédentes. Enfin, un amortisseur à glycérine assure la stabilité de tout le système suspendu (fig. 4 et 5).

Quant à la lumière, elle provient d'une lampe à vapeur de mercure dont on laisse passer la radiation verte (5461 Å) au moyen d'un filtre liquide contenu dans une cuve de 1 cm d'épaisseur, à parois parallèles. Ce filtre est une solution dans 100 cm^3 d'eau de 30 g de $So_4Cu, 5H_20$



Fig. 2. Vue générale de l'appareil, la caisse de protection étant retirée.

et 0,04 g d'un colorant vert, appelé vert SF. Les radiations jaunes sont absorbées à peu près complètement, les radiations bleues sont affaiblies d'une façon tout à fait satisfaisante. La lumière verte qui passe ainsi

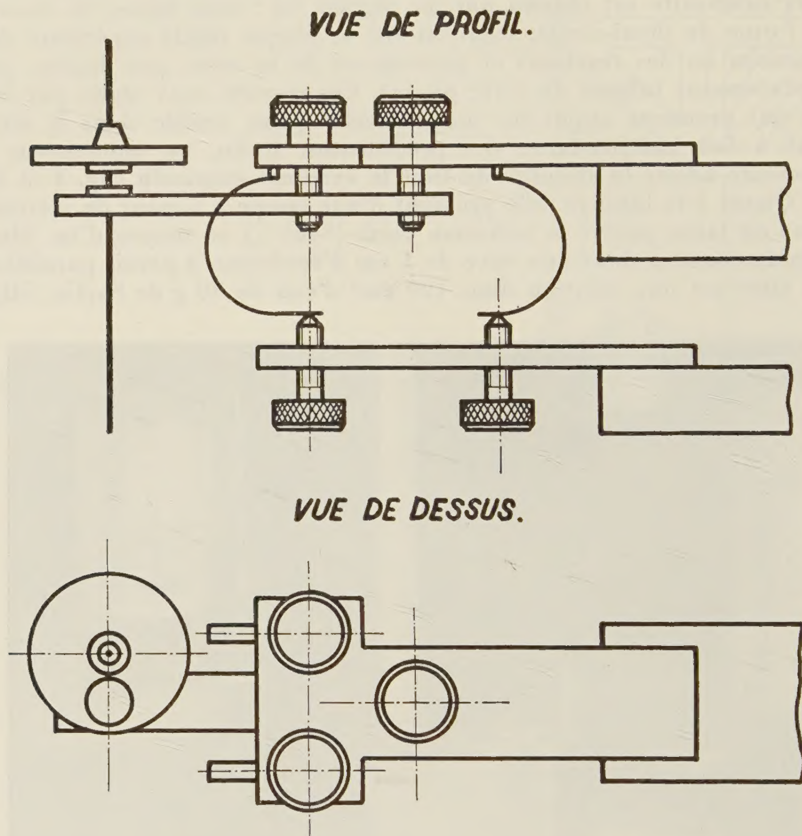


Fig. 3. Schéma de l'interféromètre et de son réglage.

arrive latéralement sur une glace argentée qui la réfléchit sur le dispositif interférentiel. Au-dessous de celui-ci, une deuxième glace, inclinée à 45° comme la première, permet l'observation des anneaux (fig. 4). Les argentures et semi-argentures sont obtenues par pulvérisation cathodique.

4. *Argenture des glaces.* — Une cloche en verre reposant sur une platine en laiton est en communication avec une pompe à vide actionnée par un moteur électrique. A la partie supérieure de la cloche se trouve la cathode en argent ; la platine sert d'anode. Une différence de potentiel de 4750 volts est fournie par un transformateur. Les glaces à argenter reposent sur un cristallisoir retourné et situé à 6 cm environ de la

cathode. Pour faire le vide dans la cloche, il faut une quinzaine de minutes, la pression s'abaisse à une fraction de mm. A ce moment, et sans interrompre le travail de la pompe, on établit le courant. Des lueurs violettes envahissent toute la cloche. Si le vide est assez poussé et si

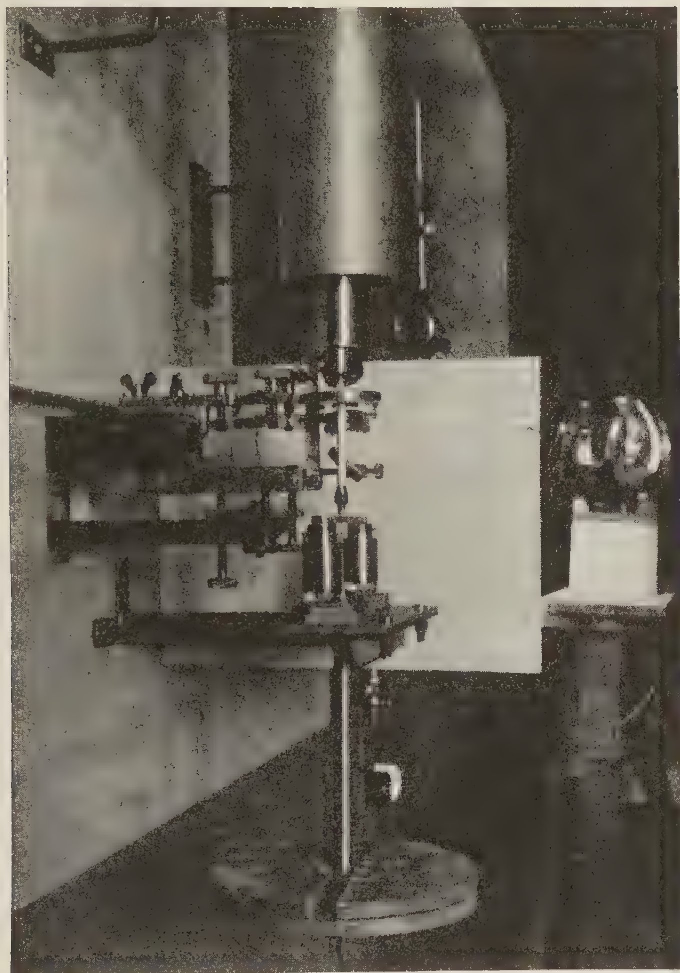


Fig. 4. Interféromètre, vis de réglage et disques de plomb suspendus au fil d'épreuve.

les joints ne présentent pas de pertes, les lueurs ne tardent pas à devenir rouges, rouge clair, puis bleu rose de plus en plus pâles. Finalement, 5 ou 6 minutes après l'établissement du courant, ces lueurs très pâles et visibles seulement dans l'obscurité ne subsistent plus que dans le haut et le bas de la cloche. C'est à partir de cet instant qu'il faut mesurer

le temps pour obtenir une argenture très faible, une semi-argenture ou une forte argenture, soit environ 3 minutes, 7 minutes ou 12 minutes respectivement. Ce n'est qu'après de nombreux essais qu'on connaît l'appareil et réussit à obtenir l'argenture voulue. La principale difficulté est d'avoir des joints sans perte ; il nous a fallu plus d'une fois les nettoyer complètement et appliquer à nouveau un lut à base de caoutchouc.

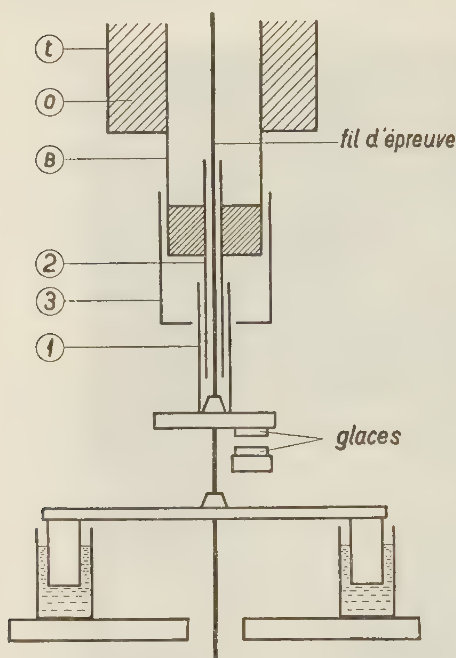


Fig. 5. Isolation thermique du bas de l'appareil, permettant la suspension libre du fil d'épreuve.

5. *Appareil d'observation.* — La lunette munie d'un oculaire micrométrique repose sur une tablette de marbre, cimentée sur deux piliers de maçonnerie. Entre ces piliers, une traverse de fer supporte le chariot de tour. On peut donc ainsi, tout à la fois, manœuvrer et observer (fig. 2).

Le réticule de l'oculaire est formé de deux fils fixes perpendiculaires et de trois fils mobiles. Nous avons employé pour nos mesures le fil mobile de gauche que nous placions sur le troisième anneau clair.

6. *Isolation thermique.* — La partie du fil comprise entre les glaces et le point de suspension est soigneusement isolée contre les variations de température. Un tube Bergmann de conduite électrique (B. fig. 5) est fixé à l'intérieur d'un tuyau de poêle *t*, l'espace annulaire, rempli d'ouate *o*. L'ensemble entoure le fil. La partie inférieure du système est fermée sans toucher le fil par un jeu de trois tubes coaxiaux qui s'emboîtent sans contact (1, 2, 3). Le premier de ces tubes repose par sa base sur le disque de laiton qui porte le verre supérieur ; il est donc solidaire du fil et vient se placer entre les deux autres qui, eux, s'attachent, par leur base supérieure, au dispositif d'isolement. La circulation d'air est ainsi pratiquement nulle et les échanges de chaleur réduits autant que possible. Enfin, l'appareil entier est enfermé dans une caisse de 2,80 m de hauteur, visible sur la figure 2. Trois fenêtres vitrées permettent l'entrée et la sortie de la lumière, la lecture d'un thermomètre de précision. Un petit trou livre passage au câble de traction et une fenêtre munie d'un volet donne accès aux vis de réglage.

B. ÉTALONNAGES ET RÉGLAGES.

1. *Etalonnage des ressorts.* — Les ressorts à boudin ont été faits, selon nos données, par la Fabrique nationale de spiraux S. A., de La Chaux-de-Fonds, et nous ont été offerts généreusement. Ce sont des ressorts en corde à piano de 1 mm de diamètre. Les ressorts eux-mêmes ont un diamètre de 2 cm. Le premier qui a 22 spires mesure donc 22 mm, le second, à peu près deux fois plus long, compte 43,7 spires.

Pour l'étalonnage, nous avons suspendu aux ressorts une charge initiale de 43 g, de manière à séparer les spires, et mesuré au cathétomètre, à 0,01 mm près, les allongements correspondant à des charges additionnelles successives.

Ressort n° 1 (pour fils de cuivre).

Charges successives	Allongement du ressort	Charge par mm d'allongement	Erreur relative p. r. à la moyenne
grammes	mm	grammes	
50	14,48	3,453	+ 0,17 %
30	8,72	3,440	— 0,23 %
30	8,72	3,440	— 0,23 %
30	8,69	3,452	+ 0,15 %
Total 140	Total 40,61	Moy. 3,447	

La loi de proportionnalité entre la force et l'allongement est suivie de façon très satisfaisante : l'écart maximum est inférieur à 1/4 %. D'ailleurs, les ressorts doivent servir à des mesures relatives : il suffit donc de les employer dans chaque mesure à peu près entre les mêmes limites d'allongement.

Ressort n° 2 (pour fils de fer).

Charges successives	Allongement du ressort	Charge par mm d'allongement	Erreur relative p. r. à la moyenne
grammes	mm	grammes	
50	7,38	6,77	+ 0,30 %
40	5,92	6,75	0
30	4,45	6,74	— 0,15 %
20	2,97	6,73	— 0,30 %
Total 140	Total 20,74	Moy. 6,75	

Ce deuxième ressort déroge légèrement à la loi de proportionnalité : il perd de sa force en s'allongeant. La remarque faite au sujet du premier ressort s'applique donc particulièrement à celui-ci et nous avons toujours pris garde de l'employer pour chaque mesure dans le même état d'allongement.

2. *Réglage des anneaux.* — Opération difficile et qu'on ne peut faire seul : il faut régler et observer en même temps. M. WAGNER, technicien-mécanicien de l'Institut de Physique, nous a aidé avec amabilité et savoir-faire dans cet exercice délicat.

Les glaces produisant les interférences reçoivent l'image d'un petit trou vivement éclairé, placé au foyer d'un collimateur. Ce collimateur, supporté par un statif fixé dans la paroi (fig. 2 et 4), peut être orienté dans toutes les directions et élevé hors du champ quand il a joué son rôle lors du réglage. La lampe à vapeur de mercure est placée à 3 m de distance pour diminuer le plus possible les variations de température au voisinage de l'appareil. Devant la lampe, une grosse lentille de 25 cm de diamètre condense la lumière sur l'appareil. Si les glaces forment un léger angle, on observe dans la lunette quatre ou cinq images du trou en ligne droite et d'intensité lumineuse décroissante. On arrive à un très bon parallélisme des glaces, bien qu'encore insuffisant, en faisant coïncider les images. On écarte alors le collimateur : on ne voit pas encore les anneaux, à moins d'une chance exceptionnelle ; on les devine seulement sur les bords. La mise au point se fait alors à l'aide du réglage fin, après quelques tâtonnements. La lunette d'observation doit être réglée en hauteur et en direction jusqu'à ce que les anneaux soient bien symétriques.

3. *Marche d'une expérience.* — Le fil recuit (dans les conditions indiquées plus bas) est mis en place avec beaucoup de soin pour le maintenir droit. Les accessoires sont fixés successivement dans un ordre déterminé et avec la plus grande prudence pour ne pas plier le fil. Le câble de traction et la caisse qui protège l'appareil contre les courants d'air et les variations de température ne sont pas encore mis en place. On suspend au ressort un poids de 100 g. Les anneaux sont cherchés et réglés comme il a été dit ci-dessus. On place alors la caisse, le filtre vert et le câble. Il est presque toujours nécessaire, après cette dernière opération, de recourir au réglage fin pour rendre aux anneaux leur maximum de netteté.

Entre le moment où ont été posés les disques de plomb constituant la charge permanente et celui où l'on est prêt à faire la première mesure, il s'écoule environ une heure. Pour avoir une première mesure acceptable, il est nécessaire d'attendre encore une demi-heure ou une heure, jusqu'au moment où la température du fil est suffisamment stabilisée. Et les mesures peuvent commencer ; chacune exige quinze à vingt minutes. Le premier jour nous avons fait une mesure toutes les quatre heures environ ; les graphiques ont montré qu'il n'était pas utile d'en faire autant pendant les jours suivants, les points étant sensiblement en ligne droite.

4. *Influence de l'élasticité du câble de traction et de la flexion de la poulie.* — Le petit câble d'acier qui commande le ressort s'allonge aussi. Cet allongement est le même dans chaque mesure : il n'intervient donc pas dans les mesures relatives. Nous avons cependant déterminé son importance, pour les mesures absolues, en comparant les extensions du ressort mesurées directement avec le cathétomètre et celles indiquées par le chariot. Dans une série de cinq mesures où le chariot indiquait une extension de 10 mm, le cathétomètre a donné une moyenne de 9,90 mm. Les lectures sur le chariot sont donc excessives de 1 %.

Quand le ressort travaille, la poulie subit une légère flexion d'un ou deux dixièmes de mm, sensiblement invariable et dont on n'a pas non plus à tenir compte. Bien que nous ayons ajouté des vis de serrage, nous ne sommes pas parvenu à diminuer davantage cette flexion.

5. *Recuit des fils.* — Les fils de cuivre ont été recuits au rouge cerise (environ 800°) pendant une heure dans la position verticale à l'aide du courant électrique. Il faut pour cela un courant très intense et une conduite électrique de gros diamètre (5 mm). Pour permettre au fil d'épreuve de se redresser librement pendant cette opération, le circuit est fermé par l'intermédiaire d'un bain de mercure (fig. 6). Pour faciliter encore le redressement, nous avons suspendu au fil pendant les dix premières minutes un poids de 2 kg et achevé le recuit sans charge aucune.

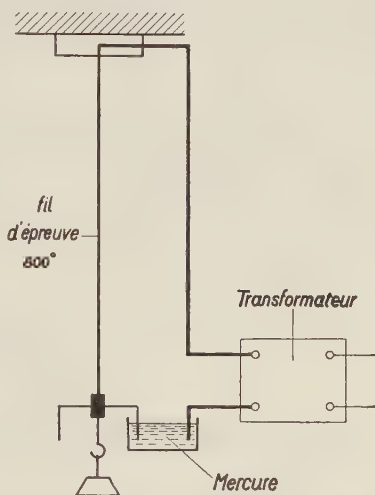


Fig. 6. Recuit des fils de cuivre à l'aide du courant électrique.

Pour diminuer le plus possible les manipulations du fil une fois recuit, nous avons envisagé la possibilité de faire le recuit sur place, dans l'appareil de mesure. Il fallut malheureusement y renoncer parce que les parties inférieure et supérieure du fil, sur une longueur de quelque 10 cm, restent sombres pendant toute l'opération et doivent être ensuite coupées.

Les fils de fer ont été recuits dans un four électrique à 800° pendant quatre ou cinq heures et refroidis lentement. Nous avons construit à cet effet un four de 1,50 m de long, dont la température était mesurée par un couple chromel-alumel. Nous avons étalonné ce dernier en choisissant comme points fixes les températures d'ébullition de l'eau, de la naphtaline et du soufre. Le pouvoir thermoélectrique de 39,6 microvolts par degré s'est montré constant. Pour un couple chromel-alumel, on peut, sans erreur sensible, extrapoler linéairement jusqu'à 1000° La température du four était lue directement sur l'échelle d'un galva-

nomètre, étalonnée en degrés à partir de la température d'ébullition du soufre. Nous avions préalablement contrôlé la constante statique du galvanomètre.

C. MÉTHODE DE MESURE.

Nous ne nous proposons pas de connaître le module d'élasticité, mais ses variations. Cela simplifie le problème et si l'on remarque que ce module est proportionnel aux allongements du ressort, toutes choses égales d'ailleurs, le tambour du chariot nous fournira directement les indications désirées. L'appareil étant monté et réglé, il suffit, sans y plus rien toucher, de mesurer à différents moments les extensions du ressort qui provoquent le passage d'un nombre déterminé d'anneaux. Nous avons fixé ce nombre à dix, aussi grand que possible pour augmenter la précision des mesures. Au-delà de dix, nous nous serions placé hors des limites permises par l'allongement du ressort (cf. page 69).

Néanmoins, à titre de contrôle, nous avons déterminé les grandeurs nécessaires à des mesures absolues. Les valeurs du module ont été en accord avec celles données habituellement. Voici, par exemple, les calculs effectués pour les mesures indiquées à la page 73 (fil de fer n° 6) et à la page 74 (fil de cuivre n° 1).

a) *Fil de fer n° 6.*

Extension du ressort		=	23,75 mm
Force du ressort		=	6,75 g/mm
Force appliquée	F	=	0,1603 kg
Allongement du fil	$\triangle 1$	=	273.10^{-5} mm
Longueur du fil	1	=	1070 mm
Section du fil	S	=	3,14 mm^2

$$E = \frac{F.1}{S.\triangle 1} = \frac{0{,}1603 \;.\; 1070}{3{,}14.273.10^{-5}} = 20\,000 \text{ kg/mm}^2$$

Les valeurs données par les tables pour le module du fer sont comprises entre 19 000 et 21 000 kg/mm².

b) *Fil de cuivre n° 1.*

Extension du ressort		=	28,15 mm
Force du ressort		=	3,44 g/mm
Force appliquée	F	=	$96{,}8.10^{-3}$ kg
Allongement du fil	$\triangle 1$	=	273.10^{-5} mm
Longueur du fil	1	=	1070 mm
Section du fil	S	=	3,14 mm^2

$$E = \frac{96{,}8 \;.\; 1070.^{-3}}{3{,}14 \;.\; 273.10^{-5}} = 12\,080 \text{ kg/mm}^2$$

Les tables indiquent 12 000 kg/mm² comme moyenne pour le module du cuivre.

Examinons l'effet des changements de température. Le fil du réticule est placé sur le troisième anneau clair. On peut estimer aisément le dixième de l'intervalle entre deux maxima d'intensité lumineuse. Or, une variation de 1/100 de degré produit pour un fil de cuivre (coefficient de dilatation $\alpha = 17.10^{-6}$) de 107 cm de long une dilatation de 0,18 μ. Le passage d'un anneau (plus précisément, de l'intervalle entre deux maxima) correspond à un allongement d'une demi-longueur d'onde, c'est-à-dire de 0,27 μ. Donc une variation de température de 0,01° entraîne le passage de 0,18/0,27 = 2/3 d'un anneau ! On juge de l'effet considérable de ces variations. C'est dire qu'il n'y a presque jamais stabilité thermique. Et presque toujours, en effet, nous avons observé un déplacement des anneaux dans un sens ou dans l'autre. Il y a bien immobilité au moment des maxima et des minima de température, ce qui pourrait inviter à provoquer ces extrêma par un chauffage approprié. Nous avons préféré éliminer autrement cette cause d'erreur : en faisant deux mesures consécutives de sens contraires, tendant puis relâchant le ressort, et prenant la moyenne. Dans les conditions habituelles, sous le simple effet thermique, il passait un anneau en huit minutes. Deux mesures consécutives se faisaient en trois minutes : les écarts étaient donc petits et pratiquement compensés, puisque de sens opposés.

Chaque point sur les graphiques qu'on trouvera plus bas traduit la moyenne de plusieurs mesures : trois en général. Chacune de ces mesures est elle-même la moyenne des deux autres : l'une correspondant à l'allongement du fil (et du ressort), l'autre à la contraction. Le nombre supérieur du tableau suivant indique la position initiale du chariot de tour, le nombre inférieur, la position finale et la différence représente l'extension ou la contraction du ressort en mm.

Fil de fer n° 6.

Mardi 19 décembre 1944, 11 h 30

Température : 11° 05

	Extension du ressort mm	Contraction du ressort mm	mm
1re mesure	39,57	16,27	
	15,84	40,14	
	23,73	23,87	23,80
2me mesure	37,65	14,52	
	14,00	38,30	
	23,65	23,78	23,72
3me mesure	38,17	14,89	
	14,57	38,74	
	23,60	23,85	23,72
11 h 52.	Moyenne définitive :		23,75

Température : 11° 05

Dans la mesure ci-dessus, on remarque que l'effet de température, que n'indique même pas le thermomètre, était une dilatation du fil. En effet, le fil s'allongeant seul, il fallait, pour faire défiler dix anneaux par traction, une extension du ressort trop faible, et trop forte, au contraire, pour la contraction.

Concernant la précision de la méthode, remarquons que l'erreur relative maximum est ici de

$$\frac{23{,}80 - 23{,}75}{23{,}75} \cdot 100 = 0{,}21 \ \%.$$

Nous avons fait la statistique des écarts relatifs maxima de la moins bonne série de mesures (fil de cuivre n° 1) et obtenu une moyenne de 0,32 %.

L'allongement du fil de dix demi-longueurs d'onde, soit de 2730 mμ, peut donc être déterminé à

$$\frac{2730 \cdot 0{,}32}{100} = 8{,}7 \text{ m}\mu \text{ près.}$$

La méthode électrique, dans le travail cité à la page 62, permettait des mesures à 11,7 mμ près [1], c'est-à-dire un peu moins précises que les nôtres.

Exemple de mesure faite pendant un abaissement de température. Les nombres de la première colonne sont dans ce cas supérieurs à ceux de la deuxième.

Fil de cuivre n° 1.

Jeudi 13 juillet 1944, 23 h 10

Température : 18° 51

	Extension du ressort mm	Relâche du ressort mm	mm
1re mesure	36,43	8,21	
	8,17	36,26	
	28,26	28,05	28,16
2me mesure	35,95	7,64	
	7,50	35,64	
	28,45	28,00	28,23
3me mesure	35,40	9,50	
	7,05	37,24	
	28,35	27,74	28,05
Température : 18° 51		Moyenne :	28,15

[1] *Op. cit.*, p. 431.

Ajoutons qu'il n'était pas possible de faire des mesures à n'importe quel moment désiré. La circulation dans la rue, les activités diverses dans le bâtiment, le vent même provoquaient une espèce de clignotement des anneaux, sinon leur disparition complète momentanée.

D. APPLICATION ET RÉSULTATS.

1. CUIVRE.

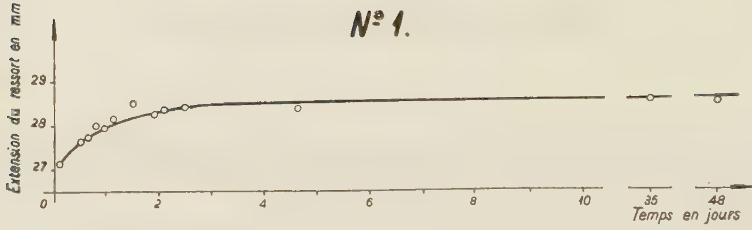
Les fils de cuivre électrolytique nous ont été fournis gracieusement par la Société d'Exploitation des Câbles électriques de Cortaillod, à laquelle nous exprimons ici nos remerciements.

Nous avons vérifié le diamètre de ces fils à 1/100 de mm près : ils étaient remarquablement réguliers.

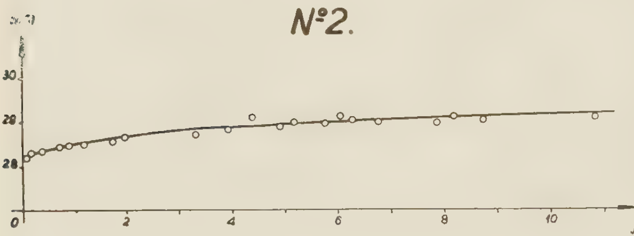
Le cuivre recuit est extrêmement mou : afin de maintenir les fils rectilignes pendant les déplacements et les manipulations diverses, nous les avons placés dans une gaine en bois. Malgré cette précaution et le plus grand soin dans leur mise en place, ils ne pouvaient rester parfaitement droits, de sorte que toute mesure avec des charges faibles, insuffisantes à redresser les fils, était impossible. D'ailleurs, ces charges eussent été impropres à produire sur l'élasticité du métal les effets attendus. Avec des charges de 7 et 8 kg, à peine plus fortes que les précédentes, on se trouvait déjà hors des limites d'élasticité, et le phénomène de fluage devenait nettement observable. Lors d'un essai avec une charge de 15 kg, le métal « filait » et s'allongeait d'une façon lente et continue : il passait un anneau toutes les 22 secondes. Les recherches directes sur le fil recuit, telles que nous nous les étions proposées, furent donc impossibles. Nous avons alors examiné les fils redressés et, de ce fait, notablement écrouis. Une charge forte étirait les fils d'une façon permanente de 1 ou 2 mm, puis les mesures étaient faites avec une charge moindre (4,6 kg).

Pour éviter une énumération fastidieuse de tous les résultats numériques de six séries de mesures, nous ne donnons que les graphiques, plus synoptiques, et, néanmoins, le tableau des résultats du fil n° 1. Dans les graphiques (fig. 7), nous avons porté en ordonnée l'allongement du ressort en mm, correspondant au passage de dix anneaux, et en abcisse, le temps en jours.

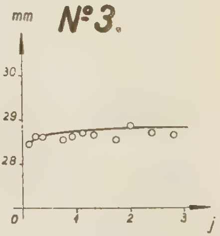
CUIVRE



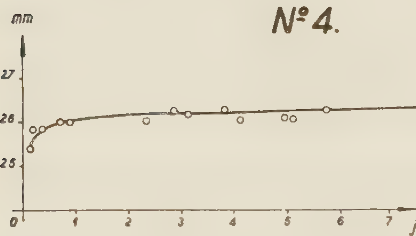
N° 1.
Extension du ressort en mm
29
28
27
0
2
4
6
8
10
35
48
Temps en jours



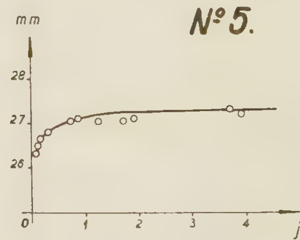
N° 2.
30
29
28
0
2
4
6
8
10
j



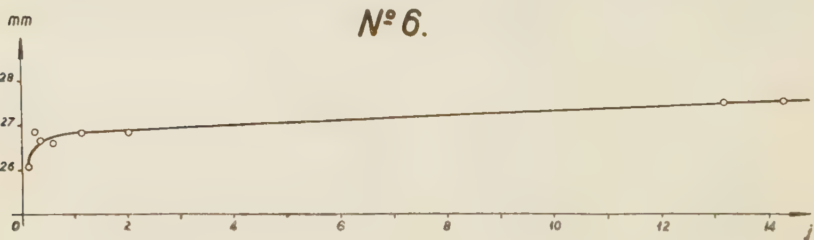
mm
N° 3.
30
29
28
0
1
2
3
j



mm
N° 4.
27
26
25
0
1
2
3
4
5
6
7
j



mm
N° 5.
28
27
26
0
1
2
3
4
j



mm
N° 6.
28
27
26
0
2
4
6
8
10
12
14
j

Fig. 7.

Cuivre n° 1.

12 juillet 1944. Pose de la charge : 20 h

Les nombres de la 4^{me} colonne correspondent à un allongement constant du fil d'épreuve et sont donc proportionnels au module d'Young.

Date	Heure	Température en degrés C	Extension du ressort en mm
12 juillet	22 h 30	19,17	27,15
13 juillet	8 h 30	18,55	27,65
	11 h 30	18,51	27,76
	14 h 30	18,57	27,99
	18 h 30	18,60	28,01
	23	18,51	28,15
14 juillet	8	18,50	28,49
	18 h 30	18,53	28,29
	22	18,58	28,34
15 juillet	8	18,55	28,42
17 juillet	11 h	19,20	28,41
15 août	10 h	21,69	28,54
28 août	11 h 30	23,50	28,54

Discussion des résultats précédents. — Quatre des six courbes ci-dessus ont la même allure : elles indiquent une *augmentation* du module d'élasticité dans les premiers jours, suivie d'une stabilisation. Le fil n° 2 accuse une augmentation plus lente, mais le module tend encore vers une valeur constante. Le module du fil n° 3 ne paraît pas avoir varié sensiblement. La variation la plus forte (n° 1) est de 5 %, ce qui représente une élévation du module de 12 000 à 12 600 kg/mm^2.

Nous nous étions proposé d'étendre nos recherches à l'or et à l'argent qui peuvent être obtenus très purs, mais sont aussi très mous. Les difficultés qui se sont présentées pour le cuivre ont découragé nos projets.

2. FER.

Le fer Armco, très pur, ne peut plus être obtenu depuis la guerre. Les fils que nous avons étudiés nous ont été offerts aimablement par la maison Notz & C^{ie}, de Bienne, que nous remercions vivement. L'analyse chimique de ces fils, confiée au Laboratoire fédéral d'essais des matériaux, de Zurich, a indiqué 99,9 % de fer et un pourcentage trop faible d'impuretés pour une détermination quantitative, ce qui nous laisse croire que la teneur en fer est même supérieure à 99,9%. Il s'agit donc

d'un fer de bonne qualité ; mais dans les problèmes d'élasticité et notamment de recristallisation, il ne faut pas oublier que les quantités les plus minimes d'impuretés peuvent jouer un rôle considérable. Si la préparation (recuit, filetage, soudage, mise en place) des fils de fer fut plus aisée que celle des fils de cuivre, les mesures en revanche furent plus difficiles, voire très pénibles, en raison de l'instabilité des anneaux. Pour des charges de 20 kg et plus, l'appareil devenait en effet plus sensible qu'un sismographe. Les moindres vibrations dues au mouvement dans la rue ou dans le bâtiment altéraient les anneaux de diverses manières : tremblements, clignotements, estompements, etc. et rendaient les mesures peu sûres ou impossibles. Pour une tension de 1050 kg/cm², les tremblements étaient presque incessants ; la limite d'élasticité était d'ailleurs dépassée, le fil s'allongeait lentement, un anneau passait toutes les dix secondes environ.

Nous avons examiné 9 fils, les tensions variant entre 540 et 1050 kg/cm². Nous donnons ci-après les résultats complets pour le fil n° 1, les graphiques seuls pour les fils 2 à 6 (fig. 8). Pour les fils 7, 8 et 9, les mesures ont été impossibles. Pour le fil n° 7 en effet (tension : 900 kg/cm²), les anneaux tremblaient d'une façon presque continuelle. Au surplus, un fluage léger était observable à la fin de chaque mesure. Les tremblements furent plus gênants encore avec une tension de 990 kg/cm² (fil n° 8) et incessants pour le fil n° 9 (1050 kg/cm²). Le fluage était considérable : un anneau passait toutes les dix secondes pendant les premières heures. Notre appareil se prêterait fort bien à une étude approfondie de ce fluage et des allongements permanents correspondant à de fortes charges.

Fer n° 1. 540 kg/cm².

19 février 1945. Pose de la charge : 15 h 30

Date	Heure	Température en degrés C	Extension du ressort en mm
19 février	18 h	11,50	22,74
	22 h	11,47	22,81
20 février	10 h 30	11,40	22,89
	20 h 30	11,60	22,83
21 février	12 h	11,62	22,83
22 février	8 h 30	11,60	22,76
	18 h	11,46	22,85
23 février	12 h	11,45	22,83
25 février	22 h	9,90	22,88
26 février	9 h 30	9,85	22,84

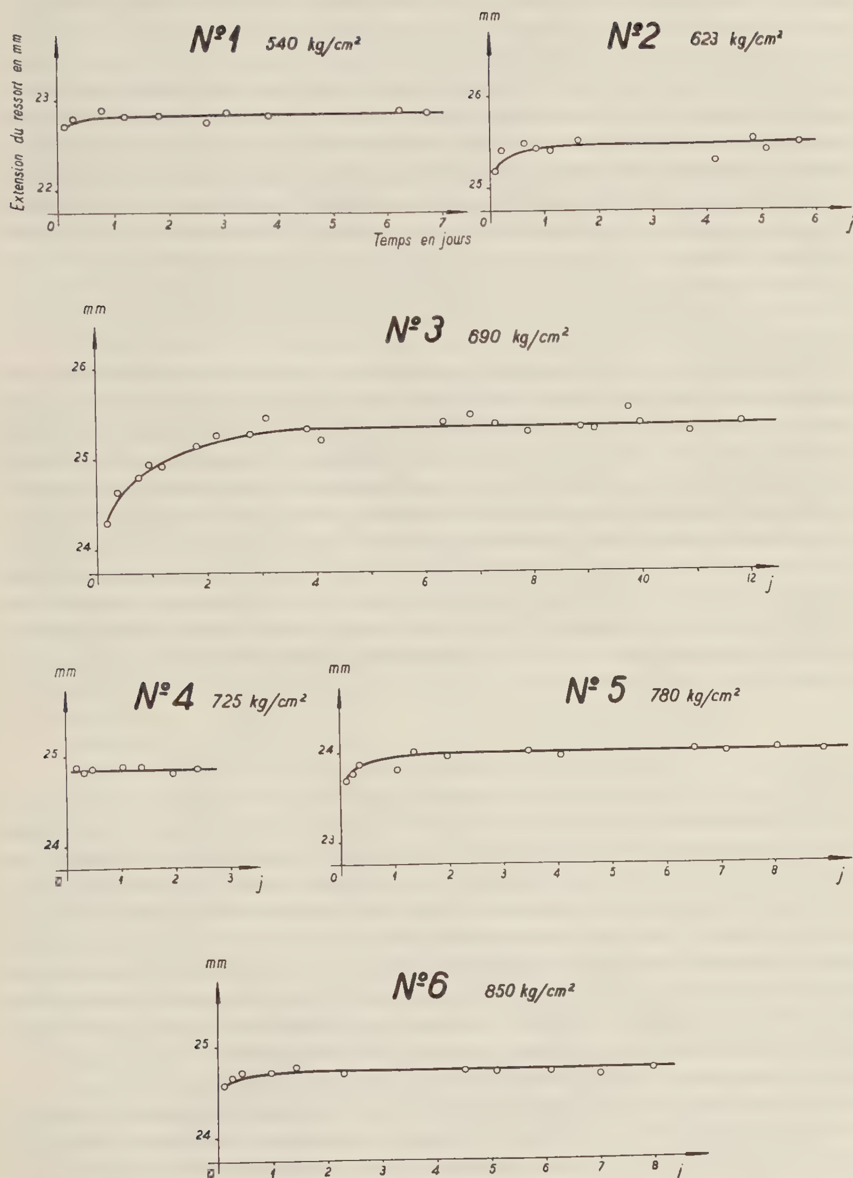

FER
N°1 540 kg/cm²
Extension du ressort en mm
23
22
0
1
2
3
4
5
6
7
Temps en jours
mm
N°2 623 kg/cm²
26
25
0
1
2
3
4
5
6
j
mm
N°3 690 kg/cm²
26
25
24
0
2
4
6
8
10
12
j
mm
N°4 725 kg/cm²
25
24
0
1
2
3
j
mm
N°5 780 kg/cm²
24
23
0
1
2
3
4
5
6
7
8
j
mm
N°6 850 kg/cm²
25
24
0
1
2
3
4
5
6
7
8
j

Fig. 8.

Discussion des résultats précédents. — De l'examen des graphiques, il ressort immédiatement qu'il n'y a pas de corrélation entre l'allure de la courbe et la charge spécifique : il semble que chaque fil a eu sa réaction propre. D'une part, cela n'est pas très surprenant si l'on songe que les propriétés élastiques d'un échantillon dépendent de son « histoire » et que nous n'étions pas sûr qu'elle fût la même pour tous nos fils, mais, d'autre part, cela s'explique par le fait que nous n'avons pas étudié un métal pur. La courbe n° 3 est semblable à celles que nous avons obtenues pour le cuivre. Pour les autres fils, le module n'a pas montré de variations notables, si ce n'est une légère augmentation pendant les premières heures. Il est probable que la variation la plus importante a lieu immédiatement après l'application de la charge. Malheureusement, notre première mesure ne pouvait se faire que deux heures environ après cette opération, temps nécessaire au réglage des anneaux, du câble de traction et à la stabilisation de la température. La limite d'élasticité se trouve vers 900 kg/cm².

Il est intéressant de remarquer, en outre, que les tremblements des anneaux augmentent avec la charge. Cela doit provenir, d'une part, comme nous l'avons dit précédemment, de ce que l'appareil devient sensible, pour les fortes charges, aux moindres trépidations du local. Mais il est bien possible, d'autre part, que ces charges exercent sur le métal une action plus profonde et fassent glisser par exemple les plans réticulaires les uns sur les autres par mouvements faibles, brusques et discontinus. Nous nous sommes demandé en outre si la mince croûte d'oxydation formée à la surface des fils (recuits à l'air libre) cédait sous l'effet des fortes charges. Mais cette explication nous paraît moins plausible, attendu que cet effet devrait diminuer avec le temps, ce que nous n'avons pas constaté.

3. EXAMEN DE QUELQUES OBJECTIONS.

Les variations constatées sont-elles le fait, comme nous le pensons, d'un changement de propriétés du métal ou simplement la traduction d'un phénomène autre, inhérent à la méthode ou à l'appareil ?

Nous avons déjà examiné en détail le problème de la température, qui constituait une des principales difficultés du travail. Des phénomènes secondaires, tels que changements de section et de température du fil, subséquents à l'allongement, donnent lieu à des corrections généralement très petites, le plus souvent négligeables et qui, pour des mesures relatives, ne jouent pas de rôle. On peut faire les mêmes remarques concernant la flexion du support de l'appareil.

Si, d'autre part, le fil avait été mal tenu, la fixité du point de suspension imparfaite, nous aurions constaté une nette différence dans les mesures à la traction et à la relâche. Cette remarque est valable aussi pour un fil non droit qui se serait redressé. Dans ce cas, au surplus, la forme des anneaux aurait varié.

Ces considérations jointes à la bonne cohérence de nos mesures nous autorisent à croire que les variations trouvées sont effectivement celles des propriétés élastiques du métal.

E. CONCLUSIONS.

Nous avons mis au point une méthode permettant de mesurer fréquemment et avec précision le module d'élasticité d'un fil métallique.

A des fils de cuivre et de fer recuits, nous avons suspendu une charge qui doit changer lentement la structure du métal recuit et avons cherché à savoir si le module d'Young varie au cours du temps et de quelle manière. Nous avons obtenu certains résultats provisoires et trouvé :

1. Que le module subit une variation ;
2. Que cette variation est une augmentation.

Fait frappant : la variation est toujours une augmentation. D'après nos essais, le module croît pendant les premières heures ou les premiers jours et prend une valeur constante. Il est probable que la principale variation se produit immédiatement après l'application de la charge. Malheureusement, notre appareil ne permettait pas de faire des mesures pendant les deux premières heures.

Pour le cuivre, le plus grand accroissement du module, de 5 %, a été obtenu avec le fil nº 1 en deux jours à peu près. Celui du fer (fil nº 3) est de 4,2% et s'étend sur trois jours.

Si nous comparons ces résultats avec celui de nos prédécesseurs [1] nous constatons qu'il y a accord sur ce fait important : augmentation du module avec le temps. En revanche, la forme de la variation diffère nettement. MM. Jaquerod et Zuber ont trouvé en effet une variation exponentielle pendant quarante jours et une augmentation de 5 % entre le premier et le quarantième jour.

Le recuit abaisse notablement la limite d'élasticité et par conséquent les charges applicables sont relativement faibles ; elles altèrent peu la structure cristalline du métal et les variations des propriétés élastiques sont faibles et difficiles à dégager des erreurs de mesure. Cela est particulièrement vrai pour les métaux mous comme le cuivre, lesquels au surplus sont fâcheusement délicats à manier si on veut maintenir les échantillons aussi droits que possible et non écrouis. D'autre part, les charges trop faibles se sont montrées insuffisantes à maintenir les fils droits et bien verticaux : les mesures sont impossibles. On se trouve ainsi doublement limité dans le choix de la valeur à donner à la charge. Peut-être serait-il préférable d'examiner des tiges plutôt que des fils.

Il est difficile d'expliquer les transformations produites dans l'édifice cristallin et l'augmentation de cohésion de la matière. Dans la *Revue de métallurgie* [2], F. M. Sayre examine l'anisotropie des cristaux isolés et son influence sur le plus ou moins d'uniformité de la distribution des

[1] *Op. cit.*, p. 442.
[2] Nº 7, juillet 1938, p. 316.

tensions à l'intérieur d'une masse ploycristalline et, par conséquent, sur sa résistance. Dans sa conclusion, en accord avec nos résultats, il dit notamment :

« Les grains orientés de façon à avoir un module élevé seront soumis à des tensions élevées et des grains voisins autrement orientés peuvent ne supporter que des tensions beaucoup plus faibles. Aux points de contact des grains soumis à des tensions élevées, il y aura une forte concentration des tensions. Il semble que le premier effet du travail à froid sera d'égaliser ces tensions et, par conséquent, d'augmenter la résistance que le métal opposera ultérieurement à des efforts exercés dans la même direction.

» ... le travail à froid déterminant une nouvelle orientation des grains aura, en général, pour effet d'augmenter la valeur de E (module d'YOUNG) et de diminuer celle de G (module au cisaillement).

» Par exemple, une barre de cuivre laminée aura un module sensiblement plus élevé que la barre ayant subi un recuit de laquelle elle provient. »

Dans cette étude première du problème, nous avons dégagé les faits principaux, situé les difficultés. Une recherche complémentaire serait d'étudier des métaux mieux connus quant à leur constitution, leur histoire thermique et mécanique. La connaissance de la grosseur des grains, que fournit la micrographie, sera utile pour serrer le problème de plus près et pour déterminer ensuite, si possible, l'effet de la charge en fonction de la grandeur de celle-ci.

TABLE DES MATIÈRES

Pages

Résumé 61

Introduction 62

A. Description de l'appareil 63
1. Principe 63
2. Organes principaux 63
3. Optique 63
4. Argenture des glaces 66
5. Appareil d'observation 68
6. Isolation thermique 68

B. Etalonnages et réglages 69
1. Etalonnage des ressorts 69
2. Réglage des anneaux 70
3. Marche d'une expérience 70
4. Influence de l'élasticité du câble de traction et de la flexion de la poulie 71
5. Recuit des fils 71

C. Méthode de mesure 72

D. Application et résultats 75
1. Cuivre 75
Discussion des résultats précédents 77
2. Fer 77
Discussion des résultats précédents 80
3. Examen de quelques objections 80

E. Conclusion 81

Manuscrit reçu le 22 janvier 1947.

IMPRIMERIE CENTRALE S. A. NEUCHATEL
1947